

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ  
КУРГАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
Кафедра “Общая физика”

**ФИЗИКА**

Часть 3

(элементы квантовой физики и физики твердого тела, элементы физики атомного ядра и элементарных частиц)

Методические указания и контрольные задания  
для студентов заочной формы обучения направлений:  
150200, 280000, 140000, 190600, 220300, 200000, 190200,  
151000, 190600, 050501, 260600, 080000, 190700, 220000;  
специальностей: 150202, 280100, 140211,  
190601, 190603, 220301, 200503, 190201,  
190202, 151001, 151002, 190601,  
260601, 080502, 190702, 220200.

Курган 2008

Кафедра общей физики

Дисциплина «Физика» для студентов заочной формы обучения направлений: 150200, 280000, 140000, 190600, 220300, 200000, 190200, 151000, 190600, 050501, 260600, 080000, 190700, 220000; специальностей: 150202, 280100, 140211, 190601, 190603, 220301, 200503, 190201, 190202, 151001, 151002, 190601, 260601, 080502, 190702, 220200.

Составили: д-р техн. наук, профессор Б.С. Воронцов,  
канд. физ.-мат.наук, доцент Т.Н. Новгородова,  
канд. физ.-мат.наук, доцент В.М. Солодовников.  
канд. пед. наук Е.Н. Полякова

Утверждены на заседании кафедры « 25 » октября 2007г.

Рекомендованы методическим советом университета  
« 14 » ноября 2007 г.

## Введение

Физика - наука о наиболее простых и вместе с тем наиболее общих формах движения материи и их взаимных превращениях. Изучаемые физикой формы движения (механическая, тепловая и др.) присутствуют во всех высших и более сложных формах движения материи (химических, биологических и др.). Поэтому они, будучи наиболее простыми, являются в то же время наиболее общими формами движения материи.

Курс физики вместе с другими дисциплинами цикла общих математических и естественнонаучных дисциплин составляет основу теоретической подготовки инженеров и играет роль фундаментальной физико-математической базы, без которой невозможна успешная деятельность инженеров любого профиля.

Дисциплина «Физика» представляет собой целостный и фундаментальный курс, единый в своих частях и демонстрирующий роль физики как основы всего современного естествознания.

Изучение курса физики совместно с другими дисциплинами цикла способствует формированию у студентов современного естественнонаучного мировоззрения. Целостность курса физики является одной из фундаментальных предпосылок для воспитания образованного специалиста.

Цель настоящих методических указаний – оказать помощь студентам заочной формы обучения технических специальностей КГУ в изучении курса физики.

### 1. Общие методические указания

Дисциплина «Физика» изучается студентами всех технических специальностей заочной формы обучения Курганского государственного университета в течение трех семестров.

Основной формой обучения студента заочной формы обучения является самостоятельная работа над учебным материалом. Эта работа организуется и направляется кафедрой общей физики КГУ. Преподаватели кафедры читают студентам установочные и обзорные лекции, проводят консультации, практические и лабораторные занятия, осуществляют текущий и итоговый контроль приобретенных знаний.

Процесс изучения физики студентами заочной формы обучения в каждом из учебных семестров состоит из следующих этапов:

- 1) проработка установочных и обзорных лекций;
- 2) самостоятельная работа над учебниками и учебными пособиями;
- 3) выполнение и защита контрольных работ;
- 4) прохождение лабораторного практикума;
- 5) сдача зачетов (если они предусмотрены учебным планом) и экзаменов.

Важнейшим аспектом самостоятельной работы студентов является выполнение контрольных работ. Контрольные работы позволяют закрепить теоре-

тический материал курса. В процессе изучения физики студент должен выполнить три контрольные работы (по одной в семестр). Контрольные работы рецензируются преподавателем и, в случае необходимости, отправляются на доработку. Обязательным элементом является последующая защита контрольной работы студентом, которая может происходить как в течение семестра, так и во время сессии.

Основные разделы курса физики для инженерно - технических специальностей распределены по контрольным работам следующим образом.

Первая контрольная работа включает в себя физические основы механики, основы молекулярной физики и термодинамики.

Вторая - физические основы электродинамики и волновую оптику.

Третья - элементы квантовой физики, квантовой статистики и физики твердого тела, элементы физики атомного ядра и элементарных частиц.

Вариант задания контрольной работы для каждого студента определяет преподаватель.

Перед выполнением контрольной работы необходимо внимательно ознакомиться с примерами решения задач по данной контрольной работе, уравнениями и формулами, а также со справочными материалами, приведенными в методических указаниях.

Каждая контрольная работа оформляется в отдельной тетради. На титульном листе должны быть указаны: номер контрольной работы, наименование дисциплины, фамилия и инициалы студента, номер учебной группы, шифр и домашний адрес.

При решении задач по физике необходимо:

1. Внимательно прочитать условие задачи. Полностью переписать условие задачи в тетрадь. Сделать краткую запись, выразить все данные в СИ. Если позволяет характер задачи, необходимо сделать рисунок, поясняющий ее сущность.

2. Уточнить, какие величины требуется найти в результате решения задачи. Дать определения этих величин, записать для них соответствующие математические соотношения.

3. Установить круг физических явлений, относящихся к данной задаче, и физические законы, лежащие в их основе. Записать в общем виде математические выражения этих законов, а также соотношения между величинами, характеризующими установленные явления с количественной точки зрения.

4. Переписать все уравнения в соответствии с условиями задачи. (Ввести обозначения величин, учесть начальные и конечные условия, число состояний и количественный состав представленной в задаче физической системы).

5. Исходя из полученных соотношений, составить замкнутую систему уравнений (число уравнений совпадает с числом неизвестных). Решить ее любым известным математическим методом. (Следует помнить, что в ряде случаев "лишние" неизвестные могут сокращаться в процессе промежуточных математических преобразований).

6. Если конечное выражение для искомой величины является достаточно сложным, то его правильность желательно проверить методом размерности.

7. Необходимо помнить, что численные значения физических величин всегда являются приближенными. Поэтому при расчетах надо руководствоваться правилами действий с приближенными числами (*приложение 4*).

Отметим, что для инженерных расчетов, как, впрочем, и для большинства физических, достаточна точность, обеспечиваемая тремя значащими цифрами.

8. Получив численный ответ, оценить его правдоподобность с позиций современной физики.

## **2. Содержание курса «ФИЗИКА»** (III семестр изучения)

### ***РАЗДЕЛ 5. КВАНТОВАЯ ФИЗИКА***

#### *Тема 13. Квантовая природа излучения*

- 13.1. Тепловое излучение. Люминесценция. Абсолютно черное тело. Закон Кирхгофа.
- 13.2. Закон Стефана-Больцмана. Распределение энергии в спектре абсолютно черного тела. Закон смещения Вина.
- 13.3. Квантовая гипотеза и формула Планка.
- 13.4. Действие света. Фотоэффект и его виды. Внешний фотоэффект. Уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта. Фотоны.
- 13.5. Энергия, масса и импульс фотонов. Давление света. Квантовое и волновое его объяснение.
- 13.6. Эффект Комптона.

#### *Тема 14. Элементы квантовой механики*

- 14.1. Обоснование идей квантования (дискретности). Атомные спектры излучения и поглощения.
- 14.2. Постулаты Бора. Линейчатые спектры атомов (по Бору). Ионизация атомов и молекул.
- 14.3. Корпускулярно-волновой дуализм. Гипотеза де Бройля. Соотношения неопределенностей.
- 14.4. Задание состояния микрочастиц. Волновая функция. Вероятность в квантовой теории. Принцип суперпозиции.
- 14.5. Общее уравнение Шредингера. Стационарное уравнение Шредингера. Операторы физических величин. Принцип причинности в квантовой механике.
- 14.6. Свободная частица. Частица в потенциальной яме. Принцип соответствия Бора.
- 14.7. Прохождение частицы сквозь потенциальный барьер. Туннельный эффект.
- 14.8. Линейный гармонический осциллятор в квантовой механике.

### *Тема 15. Строение атома, молекулы*

- 15.1. Водородоподобные атомы в квантовой механике. Квантовые числа: главное, орбитальное, магнитное. Энергетический спектр атомов и молекул.
- 15.2. Опыт Штерна и Герлаха. Спин электрона. Спиновое квантовое число.
- 15.3. Распределение электронов в атоме по состояниям. Принцип Паули. Периодическая система элементов.
- 15.4. Рентгеновские спектры. Молекулярные спектры.
- 15.5. Элементарная квантовая теория излучения. Спонтанное и вынужденное излучение. Лазер. Устройство и типы лазеров. Свойства лазерного излучения.

## *РАЗДЕЛ 6. КВАНТОВЫЕ СТАТИСТИКИ И ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА*

### *Тема 16. Элементы квантовой статистики*

- 16.1. Фазовое пространство. Элементарная ячейка. Функция распределения. Квантовые идеальные газы. Вырождение газов. Принцип неразличимости тождественных частиц. Фермионы и бозоны.
- 16.2. Квантовые идеальные газы. Распределение Бозе. Фотонный и фононный газы. Распределение фотонов по энергиям.
- 16.3. Квантовые идеальные газы. Распределение Ферми. Распределение электронов проводимости в металле по энергиям при абсолютном нуле температур. Уровень Ферми.

### *Тема 17. Строение и свойства кристаллов. Кристаллическая решетка*

- 17.1. Строение кристаллов. Экспериментальные методы исследования кристаллов. Кристаллическая решетка. Трансляционная симметрия. Элементарная ячейка. Точечные группы симметрии.
- 17.2. Точечные дефекты в кристаллах: вакансии, примеси внедрения и замещения.
- 17.3. Краевые и винтовые дислокации. Дислокации и пластичность.

### *Тема 18. Тепловые свойства твердых тел*

- 18.1. Акустические и оптические колебания кристаллической решетки. Нормальные моды.
- 18.2. Нормальные осцилляторы. Понятие о фононах, о квазиимпульсе фонона.
- 18.3. Теплоемкость кристаллов при низких и высоких температурах.

### *Тема 19. Элементы зонной теории*

- 19.1. Элементы зонной теории кристаллов. Волновые функции Блоха.
- 19.2. Зонная структура энергетического спектра электронов в моделях «сильной связи» и почти свободных электронов.
- 19.3. Заполнение зон: металлы, диэлектрики, полупроводники.

### *Тема 20. Электропроводность твердых тел*

- 20.1. Электропроводность металлов. Носители тока в металлах. Недостаточность классической электронной теории. Явления сверхпроводимости.
- 20.2. Электропроводность полупроводников. Собственные полупроводники. Понятие дырочной проводимости.
- 20.3. Носители тока как квазичастицы. Эффективная масса электрона и дырки в кристалле.
- 20.4. Примесные полупроводники.
- 20.5. Фотоэлектрические явления в полупроводниках.
- 20.6. Контактные явления.

### *Тема 21. Магнитные свойства твердых тел*

- 21.1. Магнитные свойства атомов. Магнетики.
- 21.2. Основные свойства диа- и парамагнетиков. Элементарная теория диа- и парамагнетизма.
- 21.3. Ферромагнетики. Их основные свойства. Магнитный гистерезис. Спиновая природа ферромагнетизма.
- 21.4. Антиферромагнетизм. Ферримагнетизм. Ферриты.

## Раздел 7. ЭЛЕМЕНТЫ ФИЗИКИ АТОМНОГО ЯДРА И ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

### *Тема 22. Ядро и ядерные реакции*

- 22.1. Состав ядра. Нуклоны. Магнитные и электрические свойства ядер.
- 22.2. Дефект масс и энергия связи ядра.
- 22.3. Взаимодействие нуклонов. Свойства и природа ядерных сил. Ядерные модели.
- 22.4. Радиоактивность. Закон радиоактивного превращения. Закономерности и происхождение альфа-, бета- и гамма-излучения атомных ядер. Взаимодействие излучения с веществом.
- 22.5. Ядерные реакции и их типы. Реакция деления ядра. Цепная реакция деления. Физические основы ядерной энергетики.
- 22.6. Реакции синтеза. Управляемые термоядерные реакции.

### *Тема 23. Элементарные частицы*

- 23.1. Элементарные частицы и их классификация. Адроны. Кварки. Лептоны. Стандартная модель элементарных частиц.
- 23.2. Физический вакуум. Частицы и античастицы. Взаимопревращаемость элементарных частиц.
- 23.3. Типы фундаментальных взаимодействий. Характеристики фундаментальных взаимодействий. Симметрия законов природы. Кварки, лептоны и кванты фундаментальных полей.

- 23.4. Физическая картина мира. Вещество и поле. Корпускулярная и континуальная концепции описания природы. Незавершенность физики и будущее естествознания.

### Список литературы

#### *Основная литература*

1. Трофимова Т.И. Курс физики. – М.: Высшая школа, 2003.
2. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. – М.: Изд.центр «Академия», 2003.
3. Савельев И.В. Курс физики. Т.1-3. – М.: Наука, 1989.
4. Епифанов Г.И. Физика твердого тела. - М.: Высшая школа, 1977.

#### *Электронная учебно – методическая литература*

1. Козел С.М., Соболева Н.Н. Учебный компьютерный курс «Открытая физика 1.1». - Долгопрудный: ООО «ФИЗИКОН», 2001.

#### *Дополнительная литература*

1. Суханов Л.Д. Фундаментальный курс физики. – М.: Агор, 1996.
2. Орир Дж. Физика. – М.: Мир, 1981. Т.1-2.
3. Бордовский Г.А., Бурсиан Э.В. Общая физика: Курс лекций. – М.: Владос. Пресс, 2001. Т.1,2.
4. Кибец И.Н., Кибец В.И. Физика: Справочник. - Харьков: Фолио, 1997.
5. Окунь Л.Б. Физика элементарных частиц. – М.: Наука, 1988.
6. Бутиков Е.Н. Оптика. – М.: Высшая школа, 1987.
7. Широков Ю.М., Юдин Н.П. Ядерная физика. – М.: Наука, 1980.
- 8. Эбелинг В., Энгель А., Файстель Р. Физика процессов эволюции (синергетический подход). – М.: Эдиториал УРСС, 2001.**
9. Мотылева Л.С., Скоробогатов В.А., Судариков А.М. Концепции современного естествознания. – СПб.: Союз, 2000.

#### *Сборники задач*

1. Чертов А.Г., Воробьев А.А. Задачник по физике. – М.: Изд-во физ.-мат. литературы, 2003.
2. Трофимова Т.И. Сборник задач по курсу физики. – М.: Высшая школа, 1996.



3. Трофимова Т.И., Павлова З.Г. Сборник задач по курсу физики с решениями. – М.: Высшая школа, 1995.
4. Волькенштейн В.С. Сборник задач по общему курсу физики. – СПб.: Книжный мир, 2004.
5. Иродов И.Е. Задачи по общей физике. – М.: Наука, 1988.

### 3. Основные формулы

**Энергия теплового излучения, испускаемого черным телом за время  $t$**

где  $R_e$  - энергетическая светимость черного тела,  $S$  - площадь его поверхности.

$$W = R_e \cdot S \cdot t,$$

**Закон Стефана – Больцмана**

где  $R_e$  - энергетическая светимость черного тела;  $\sigma$  - постоянная Стефана - Больцмана;  $T$  - термодинамическая температура.

$$R_e = \sigma T^4,$$

**Закон смещения Вина**

где  $\lambda_{\max}$  - длина волны, соответствующая максимальному значению спектральной плотности энергетической светимости черного тела (максимальному значению функции Кирхгофа),  $b$  - постоянная Вина.

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T},$$

**Формула Планка**

где  $r_{v,T}$  - спектральная плотность энергетической светимости черного тела,  $h$  - постоянная Планка;  $c$  - скорость света в вакууме;  $\nu$  - частота излучения;  $T$  - термодинамическая температура.

$$r_{v,T} = \frac{2\pi h \nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1},$$

**Давление, производимое светом при нормальном падении на поверхность непрозрачного тела**

где  $I$  - интенсивность падающего света (энергия всех фотонов, падающих на единицу поверхности в единицу времени),  $\rho$  - коэффициент отражения,  $c$  - скорость света в вакууме.

$$P = \frac{I}{c} (1 + \rho),$$

**Энергия кванта (фотона)**

где  $h$  - постоянная Планка;  $c$  - скорость света в вакууме;  $\nu$  - частота излучения;  $\lambda$  - длина волны.

$$\varepsilon = h\nu = \frac{hc}{\lambda},$$

**Масса фотона**

$$m_\gamma = \frac{h\nu}{c^2} = \frac{h}{c \cdot \lambda},$$

**Импульс фотона**

$$p_\gamma = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}.$$

### Уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта

где  $\nu$  - частота падающего на катод света,  $A_B$  - работа выхода электрона из металла;  $m$  – масса электрона;  $v_{\max}$  - максимальная скорость фотоэлектрона.

$$h\nu = A_B + \frac{mv_{\max}^2}{2},$$

### Красная граница фотоэффекта

$$\nu_0 = \frac{A_B}{h},$$

$$\lambda_0 = \frac{hc}{A_B}.$$

### Обобщенная формула Бальмера

где  $\nu$  - частота излучения;  $\lambda$  - длина волны,  $n=1,2,3, \dots$  - номер уровня, на который происходит переход;  $k = n+1, n+2, n+3, \dots$  - номер уровня, с которого происходит переход;  $R$  и  $R' = R/c$  - постоянные Ридберга.

$$\nu = R \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2} \right)$$

или  $\frac{1}{\lambda} = R' \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2} \right),$

### Спектральные серии излучения атома водорода:

серия Лаймана

серия Бальмера

серия Пашена

серия Брэкета

серия Пфунда

серия Хэмфри

$n=1, k=2,3,4, \dots$

$n=2, k=3,4,5, \dots$

$n=3, k=4,5,6, \dots$

$n=4, k=5,6,7, \dots$

$n=5, k=6,7,8, \dots$

$n=6, k=7,8,9, \dots$

### Радиус $n$ -й стационарной орбиты электрона в атоме водорода в модели Бора

где  $m$  – масса электрона,  $e$  – элементарный заряд,  $\epsilon_0$  - электрическая постоянная,  $n=1, 2, \dots$

$$r_n = n^2 \frac{h^2 \epsilon_0}{m\pi e^2},$$

### Полная энергия электрона в атоме водорода

$n=1,2,3, \dots$

$$E_n = -\frac{1}{n^2} \frac{me^4}{8h^2 \epsilon_0^2},$$

### Длина волны де Бройля

где  $p = mv$  - импульс микрочастицы.

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv},$$

### Соотношения неопределенностей Гейзенберга

$\Delta x, \Delta y, \Delta z$  - неопределенности координат микрочастицы,

$\Delta p_x, \Delta p_y, \Delta p_z$  - неопределенности соответствующих про-

$$\Delta x \Delta p_x \geq \hbar,$$

$$\Delta y \Delta p_y \geq \hbar,$$

$$\Delta z \Delta p_z \geq \hbar,$$

екций импульса,  $\hbar = \frac{h}{2\pi}$  - постоянная Планка.

**Вероятность** нахождения микрочастицы  $dW$  в элементе объема  $dV$  вблизи точки с координатами  $(x,y,z)$

где  $\Psi$  - волновая функция, зависящая от координат и времени  $(x, y, z, t)$ .

$$dW = |\Psi|^2 dV,$$

**Вероятность обнаружить частицу в момент времени  $t$  в конечном объеме  $V$**

$$W = \int_V |\Psi|^2 dV.$$

**Плотность вероятности нахождения частицы в соответствующем месте пространства**

$$w = |\Psi|^2.$$

**Общее уравнение Шредингера (уравнение Шредингера, зависящее от времени)**

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \Delta \Psi + U(x, y, z, t) \Psi = i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t},$$

где  $m$  - масса частицы,  $\Delta$  - оператор Лапласа,  $i$  - мнимая единица,  $U(x, y, z, t)$  - потенциальная функция частицы в силовом поле, в котором она движется,  $\Psi(x, y, z, t)$  - искомая волновая функция частицы.

**Уравнение Шредингера для стационарных состояний**

$$\Delta \Psi + \frac{2m}{\hbar^2} [E - U(x, y, z)] \Psi = 0,$$

где  $E$  - полная энергия,  $U=U(x, y, z)$  - потенциальная энергия частицы,

$\Delta \Psi = \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2}$  - оператор Лапласа.

**Полная энергия частицы, находящейся в одномерной потенциальной яме с бесконечно высокими стенками**

где  $n=1, 2, 3, \dots$  - главное квантовое число,  $m$  - масса частицы,  $\ell$  - ширина потенциальной ямы

$$E_n = \frac{n^2 \pi^2 \hbar^2}{2m\ell^2},$$

**Собственные волновые функции такой частицы**

где  $n=1, 2, 3, \dots$

$$\Psi_n(x) = \sqrt{\frac{2}{\ell}} \sin \frac{n\pi}{\ell} x,$$

**Стационарное уравнение Шредингера для электрона в водородоподобном атоме**

$$\Delta \Psi + \frac{2m}{\hbar^2} \left( E + \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r} \right) \Psi = 0,$$

где  $m$  - масса электрона,  $E$  - полная энергия электрона в атоме.

**Собственные значения энергии электрона в водородоподобном атоме**

где  $n=1, 2, 3, \dots$  - главное квантовое число.

$$E_n = -\frac{1}{n^2} \frac{Z^2 m e^4}{8h^2 \epsilon_0^2},$$

**Момент импульса (механический орбитальный момент импульса) электрона**

где  $\ell = 0, 1, \dots, (n-1)$ , - орбитальное квантовое число.

$$L = \hbar \sqrt{\ell(\ell+1)},$$

**Проекция момента импульса электрона на направление  $Z$  внешнего магнитного поля**

где  $m$  - магнитное квантовое число, которое, при заданном  $\ell$ , может принимать значения:  $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm \ell$

$$L_z = \hbar m,$$

**Спин электрона - собственный (неуничтожимый) механический момент импульса**

$$L_s = \hbar \sqrt{s(s+1)},$$

где  $s=1/2$  - спиновое квантовое число.

**Проекция спина электрона на направление внешнего магнитного поля**

$$L_{sz} = \hbar m_s,$$

где  $m_s = \pm 1/2$  - магнитное спиновое квантовое число.

**Молярная теплоемкость кристаллической решетки**

при температуре  $T \ll \theta_D$ :

$$C_v = \frac{12\pi^4}{5} R \left( \frac{T}{\theta_D} \right)^3,$$

при температуре  $T \gg \theta_D$ :

$$C_v = 3R,$$

где  $R$  – молярная газовая постоянная,  $T$  – температура кристалла,  $\theta_D$  - характеристическая температура Дебая.

**Символическая запись ядра**



где  $X$  - символ химического элемента,  $Z$  - зарядовое число (число протонов в ядре, совпадающее с порядковым номером в периодической таблице элементов),  $A$  - массовое число (число нуклонов в ядре).

**Дефект массы ядра**

где  $m_p$ ,  $m_n$ ,  $m_y$  - соответственно массы протона, нейтрона и ядра,  $m_1H$  - масса

$$\begin{aligned} \Delta m &= [Zm_p + (A - Z)m_n] - m_y = \\ &= [Zm_1H + (A - Z)m_n] - m_a, \end{aligned}$$

атома водорода,  $m_a$  - масса атома.

**Энергия связи нуклонов в ядре**

$$E_{cb} = \Delta m \cdot c^2.$$

**Закон радиоактивного распада**

где  $N$  - число нераспавшихся ядер в момент времени  $t$ ;  $N_0$  - число нераспавшихся ядер в начальный момент (при  $t=0$ );  $e$  - основание натурального логарифма;  $\lambda$  - постоянная радиоактивного распада.

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda t},$$

**Период полураспада**

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda}.$$

**Среднее время жизни радиоактивного ядра**

$$\tau = \frac{1}{\lambda}.$$

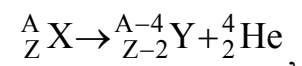
**Активность нуклида (активность изотопа)**

где  $A_0 = \lambda \cdot N_0$  - активность изотопа в начальный момент времени ( $t=0$ ).

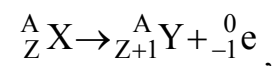
$$A = -\frac{dN}{dt} = A_0 e^{-\lambda t},$$

**Правила смещения:**

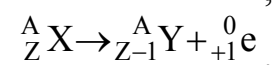
для  $\alpha$  - распада



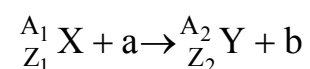
для  $\beta^-$  - распада



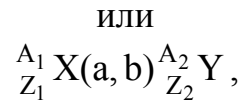
для  $\beta^+$  - распада



**Символическая запись ядерной реакции**



где  ${}_{Z_1}^{A_1}X$ ,  ${}_{Z_2}^{A_2}Y$  - исходное и конечное ядра, соответственно с зарядовыми числами  $Z_1$  и  $Z_2$  и массовыми числами  $A_1$  и  $A_2$ ;  $a$  и  $b$  - соответственно бомбардирующая и испускаемая (или испускаемые) в ядерной реакции частицы.



**Энергия ядерной реакции**  
 (ее энергетический эффект)

$$Q = c^2[(m_1 + m_2) - (m_3 + m_4)],$$

где  $m_1$  и  $m_2$  - массы покоя ядра мишени и бомбардирующей частицы;  $m_3$  и  $m_4$  - массы покоя ядер (частиц) продуктов реакции.

#### 4. Примеры решения задач

**Пример 1.** Максимум спектральной плотности энергетической светимости Солнца приходится на длину волны  $\lambda = 0,48$  мкм. Считая, что Солнце излучает как черное тело, определить: 1) температуру его поверхности; 2) мощность, излучаемую его поверхностью.

Дано:	СИ:
$\lambda = 0,48$ мкм	$4,8 \cdot 10^{-7}$ м
$R_C = 6,95 \cdot 10^8$ м	
T - ?	
P - ?	

**Решение**  
 Согласно закону смещения Вина, искомая температура поверхности Солнца:

$$T = \frac{b}{\lambda_{\max}}, \quad (1)$$

где  $b = 2,9 \cdot 10^{-3}$  м · К - постоянная Вина.

Мощность, излучаемая поверхностью Солнца:

$$P = R_e S, \quad (2)$$

где  $R_e$  - энергетическая светимость черного тела (Солнца),  $S = 4\pi R_C^2$  - площадь поверхности Солнца,  $R_C$  - радиус Солнца.

Согласно закону Стефана - Больцмана:

$$R_e = \sigma T^4, \quad (3)$$

где  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup> · К<sup>4</sup>) - постоянная Стефана - Больцмана.

Подставим записанные выражения в формулу (2), найдем искомую мощность, излучаемую поверхностью Солнца:

$$P = 4\pi\sigma T^4 R_C^2. \quad (4)$$

Вычисляя, получим:  $T = 6,04$  кК;  $P = 4,58 \cdot 10^{26}$  Вт.

**Пример 2.** Определить длину волны  $\lambda$ , массу и импульс фотона с энергией  $\varepsilon = 1$  МэВ.

Дано:	СИ:	Решение
$\varepsilon = 1 \text{ МэВ}$	$1,6 \cdot 10^{-13} \text{ Дж}$	Энергия фотона связана с длиной волны света соотношением: $\varepsilon = \frac{hc}{\lambda}$ , где $h$ – постоянная Планка, $c$ – скорость света в вакууме. Отсюда $\lambda = \frac{hc}{\varepsilon}$ .
$\lambda - ?$		
$m - ?$		
$p - ?$		

Подставив численные значения, получим:  $\lambda = 1,24 \cdot 10^{-12} \text{ м}$ .

Массу фотона определим, используя формулу Эйнштейна  $\varepsilon = mc^2$ . Масса фотона  $m = \frac{\varepsilon}{c^2} = 1,78 \cdot 10^{-30} \text{ кг}$ .

Импульс фотона  $p = mc = \frac{\varepsilon}{c} = 5,3 \cdot 10^{-22} \text{ кг м/с}$ .

**Пример 3.** Натриевый катод вакуумного фотоэлемента освещается монохроматическим светом с длиной волны  $\lambda = 40 \text{ нм}$ . Определить задерживающее напряжение, при котором фототок прекращается. "Красная граница" фотоэффекта для натрия  $\lambda_0 = 584 \text{ нм}$ .

Дано:	СИ:	Решение
$\lambda = 40 \text{ нм}$	$0,4 \cdot 10^{-7} \text{ м}$	Электрическое поле, препятствующее движению электронов от катода к аноду, называют обратным. Напряжение, при котором фототок полностью прекращается, называется задерживающим напряжением. При таком задерживающем напряжении $U_0$ ни один из электронов, даже обладающий при вылете из катода максимальной скоростью $v_{\text{max}}$ , не может преодолеть задерживающего поля и достигнуть анода. При этом начальная кинетическая энергия фотоэлектронов ( $E_k = \frac{mv_{\text{max}}^2}{2}$ ) переходит в потенциальную ( $E_{\text{пот}} = eU_0$ , где $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ – элементарный заряд, а $U_0$ – наименьшее задерживающее напряжение). По закону сохранения энергии
$\lambda_0 = 584 \text{ нм}$	$5,84 \cdot 10^{-7} \text{ м}$	
$U_0 - ?$		

Электрическое поле, препятствующее движению электронов от катода к аноду, называют обратным. Напряжение, при котором фототок полностью прекращается, называется задерживающим напряжением. При таком задерживающем напряжении  $U_0$  ни один из электронов, даже обладающий при вылете из катода максимальной скоростью  $v_{\text{max}}$ , не может преодолеть задерживающего поля и достигнуть анода. При этом начальная кинетическая энергия фотоэлектронов ( $E_k = \frac{mv_{\text{max}}^2}{2}$ ) переходит в потенциальную ( $E_{\text{пот}} = eU_0$ , где  $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$  – элементарный заряд, а  $U_0$  – наименьшее задерживающее напряжение). По закону сохранения энергии

$$\frac{mv_{\text{max}}^2}{2} = eU_0. \quad (1)$$

Кинетическую энергию электронов найдем, используя уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта:

$$\frac{hc}{\lambda} = A_B + \frac{mv_{\max}^2}{2}. \quad (2)$$

Отсюда 
$$\frac{mv_{\max}^2}{2} = \frac{hc}{\lambda} - A_B. \quad (3)$$

Работа выхода электронов  $A_B$  определяется красной границей фотоэффекта:

$$A_B = \frac{hc}{\lambda_0}. \quad (4)$$

Подставив выражение (4) в уравнение (3), получим:

$$\frac{mv_{\max}^2}{2} = \frac{hc}{\lambda} - \frac{hc}{\lambda_0} = hc \left( \frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_0} \right).$$

Тогда, из уравнения (1) 
$$U_0 = \frac{hc}{e} \left( \frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_0} \right).$$

Вычисляя, получим  $U_0 = 28,9 \text{ В}$ .

**Пример 4.** Кинетическая энергия протона в четыре раза меньше его энергии покоя. Вычислить длину волны де Бройля для протона.

Решение

Дано:
$E_k = E_0/4$
$\lambda - ?$

Длина волны де Бройля определяется по формуле:

$$\lambda = \frac{h}{p}, \quad (1)$$

где  $h$  – постоянная Планка,  $p = mv$  - импульс частицы.

По условию задачи кинетическая энергия протона сравнима по величине с его энергией покоя  $E_0$ . Следовательно, импульс и кинетическая энергия связаны между собой релятивистским соотношением:

$$p = \frac{1}{c} \sqrt{E_k (E_k + 2E_0)}, \quad (2)$$

где  $c$  – скорость света в вакууме.

Используя условие задачи, получим:  $p = \frac{3}{4} \frac{E_0}{c}$ . Подставив полученное выражение в формулу (1), найдем длину волны де Бройля:

$$\lambda = \frac{4hc}{3E_0}.$$

Энергию покоя электрона найдем по формуле Эйнштейна  $E_0 = m_0 c^2$ , где  $m_0$  - масса покоя электрона,  $c$  - скорость света в вакууме.

Подставив числовые значения, получим:  $\lambda = 1.77 \cdot 10^{-15} \text{ м}$ .

**Пример 5.** Электронный пучок ускоряется в электронно-лучевой трубке разностью потенциалов  $U=0,5$  кВ. Принимая, что неопределенность импульса электрона равна  $0,1$  % от его числового значения, определить неопределенность координаты электрона. Является ли в данных условиях электрон квантовой или классической частицей?

Дано:	СИ:	Решение
$U=0,5$ кВ	$500$ В	В направлении движения пучка электронов (ось X) соотношение неопределенностей имеет вид: $\Delta x \Delta p_x \geq \hbar, \quad (1)$ где $\Delta x$ - неопределенность координаты электрона; $\Delta p_x$ - неопределенность его импульса;
$\Delta p_x = 0,001 p_x$		
$\Delta x - ?$		

$$\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1,055 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} - \text{постоянная Планка.}$$

Пройдя ускоряющую разность потенциалов, электрон приобретает кинетическую энергию  $E_k$ , равную работе сил электрического поля:

$$E_k = e \cdot U.$$

Расчет дает значение  $E_k=500$  эВ, что много меньше энергии покоя электрона ( $E_0 = 0,51$  МэВ). Следовательно, в данных условиях электрон является нерелятивистской частицей, имеющей импульс, связанный с кинетической энергией формулой

$$E_k = p^2 / 2m_0.$$

$$\text{Тогда: } p = \sqrt{2m_0 E_k} = \sqrt{2m_0 eU} = 1,24 \cdot 10^{-23} \text{ кг} \cdot \text{м} / \text{с}.$$

Согласно условию задачи, неопределенность импульса  $\Delta p_x = 0,001 p_x = 1,24 \cdot 10^{-26} \text{ кг} \cdot \text{м} / \text{с}$ , т.е.  $\Delta p_x \ll p_x$ .

Это значит, что волновые свойства в данных условиях несущественны и электрон может рассматриваться как классическая частица. Из выражения (1) следует, что искомая неопределенность координаты электрона

$$\Delta x = \hbar / \Delta p_x.$$

Вычислив, получим  $\Delta x \approx 8,51$  нм.

**Пример 6.** В результате перехода из одного стационарного состояния в другое атомом водорода был испущен квант с частотой  $\nu = 2,924 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$ . Найти, как изменились радиус орбиты и скорость движения электрона, используя теорию Бора.

Дано:	Решение
$\nu = 2,924 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$	Излучение с частотой $\nu = 2,924 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$ соответ-
$r_k / r_n; v_k / v_n - ?$	



ствуется длине волны  $\lambda = \frac{c}{\nu} = 102,6 \text{ нм}$  ( $c$  – скорость света в вакууме), лежащей в ультрафиолетовой области. Следовательно, спектральная линия принадлежит серии Лаймана, возникающей при переходе электрона на первый энергетический уровень ( $n=1$ ).

Используем обобщенную формулу Бальмера, чтобы определить номер энергетического уровня ( $k$ ), с которого был совершен переход:

$$\nu = R \cdot \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2} \right).$$

Выразим из этой формулы  $k$ :

$$k = \sqrt{\left( 1 - \frac{\nu}{R} \right)}.$$

Подставляя имеющиеся данные, получим  $k=3$ . Следовательно, излучение произошло в результате перехода электрона с третьей орбиты на первую.

Значения радиусов  $r_n$  орбит и скоростей движения электронов  $v_n$  на этих орбитах найдем из следующих соображений.

На электрон, находящийся на стационарной орбите в атоме водорода, со стороны ядра действует сила Кулона

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{e^2}{r_n^2},$$

которая сообщает ему нормальное ускорение  $a_n = \frac{v^2}{r_n}$ . Следовательно, согласно

основному закону динамики:

$$\frac{m_e v^2}{r_n} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{e^2}{r_n^2}. \quad (1)$$

Кроме того, согласно постулату Бора, момент импульса электрона на стационарной орбите должен быть кратен постоянной Планка, т.е.

$$m_e v r_n = n \frac{h}{2\pi}, \quad (2)$$

где  $n = 1, 2, 3 \dots$  – номер стационарной орбиты.

Из уравнения (2) скорость  $v = \frac{nh}{2\pi m_e r_n}$ . Подставив это выражение в уравнение (1), получим

$$\frac{m_e n^2 h^2}{4\pi^2 m_e^2 r_n^2} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_n}.$$

Отсюда радиус стационарной орбиты электрона в атоме водорода:

$$r_n = \frac{\epsilon_0 h^2 n^2}{\pi m_e e^2}.$$

Тогда скорость электрона на этой орбите:

$$v_n = \frac{e^2}{2\varepsilon_0 h n}.$$

Принимая, что до излучения кванта электрон имел характеристики  $r_3, v_3$ , а после излучения  $r_1, v_1$  несложно получить:

$$\frac{r_1}{r_3} = \frac{n^2}{k^2} = \frac{1}{9}; \quad \frac{v_1}{v_3} = \frac{k}{n} = 3,$$

то есть, радиус орбиты уменьшился в 9 раз, скорость электрона увеличилась в 3 раза.

**Пример 7.** Электрон в одномерной прямоугольной "потенциальной яме" шириной  $\ell = 200$  пм с бесконечно высокими "стенками" находится в возбужденном состоянии ( $n=2$ ). Определить: 1) вероятность  $W$  обнаружения электрона в средней трети "ямы"; 2) точки указанного интервала, в которых плотность вероятности обнаружения электрона максимальна и минимальна.

Дано:	СИ:
$\ell = 200$ пм	$2 \cdot 10^{-10}$ м
$x_1 = \frac{\ell}{3}$	
$x_2 = \frac{2\ell}{3}$	
1) $W$ - ?	
2) $x_{\max}$ - ?	
$x_{\min}$ - ?	

### Решение

1. Вероятность обнаружить частицу в интервале  $x_1 < x < x_2$  равна:

$$W = \int_{x_1}^{x_2} |\psi_n(x)|^2 dx. \quad (1)$$

Возбужденному состоянию ( $n=2$ ) отвечает собственная волновая функция:

$$\psi_n(x) = \sqrt{\frac{2}{\ell}} \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{\ell} \cdot x\right). \quad (2)$$

Подставим (2) в (1) и учтем, что  $x_1 = \frac{\ell}{3}$  и  $x_2 = \frac{2\ell}{3}$ :

$$W = \frac{2}{\ell} \int_{\frac{\ell}{3}}^{\frac{2\ell}{3}} \sin^2\left(\frac{2\pi x}{\ell}\right) dx.$$

Выразив  $\sin^2\left(\frac{2\pi x}{\ell}\right)$  через косинус двойного угла с использованием три-

гонометрического равенства  $\sin^2\left(\frac{2\pi x}{\ell}\right) = \frac{1}{2}\left(1 - \cos\frac{4\pi x}{\ell}\right)$ , получим выраже-

ние для искомой вероятности:

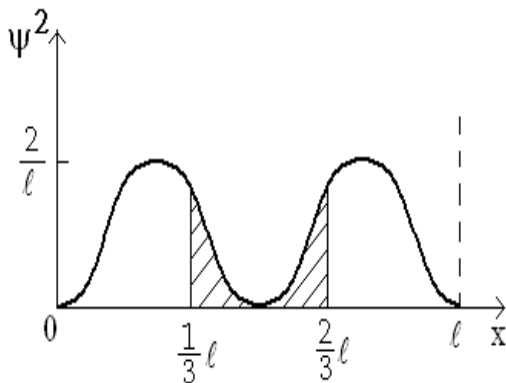
$$W = \frac{1}{\ell} \int_{\frac{\ell}{3}}^{\frac{2\ell}{3}} dx - \frac{1}{\ell} \int_{\frac{\ell}{3}}^{\frac{2\ell}{3}} \cos\left(\frac{4\pi x}{\ell}\right) dx =$$

$$= \frac{1}{\ell} \left( \frac{2\ell}{3} - \frac{\ell}{3} \right) - \frac{1}{\ell} \frac{\ell}{4\pi} \left( \sin \frac{4\pi \cdot 2\ell}{\ell \cdot 3} - \sin \frac{4\pi \cdot \ell}{\ell \cdot 3} \right) = \frac{1}{3} - \frac{1}{4\pi} \left( \sin \frac{8\pi}{3} - \sin \frac{4\pi}{3} \right) = 0,195.$$

2. Плотность вероятности существования частицы в некоторой области пространства определяется квадратом модуля ее волновой функции  $w = |\psi_n(x)|^2$ . Используя выражение (2), получим:

$$w = \frac{2}{\ell} \sin^2\left(\frac{2\pi}{\ell} x\right). \quad (3)$$

Зависимость квадрата модуля волновой функции частицы от ее координаты, определяемая выражением (3), приведена на рисунке.



Очевидно, что минимальная плотность вероятности  $w=0$  соответствует значениям  $x$ , при которых  $\sin \frac{2\pi}{\ell} x = 0$ .

То есть,  $\frac{2\pi}{\ell} x = \pi \cdot k$ , где  $k = 0, 1, 2, \dots$

Отсюда  $x_{\min} = 0, \frac{\ell}{2}, \ell$ .

Максимального значения в пределах ямы плотность вероятности  $w$  достигает при условии:  $\sin \frac{2\pi}{\ell} x = \pm 1$ . Соответствующие значения  $x_{\max} = \frac{\ell}{4}, \frac{3\ell}{4}$ .

Как видно из графика зависимости  $w = w(x)$ , приведенного на рисунке, в интервал  $\frac{\ell}{3} < x < \frac{2\ell}{3}$  попадает только значение  $x_{\min} = \frac{\ell}{2}$ . В пределах указанного интервала плотность вероятности  $w$  достигает максимального значения на границах интервала при  $x_1 = \frac{\ell}{3}$  или  $x_2 = \frac{2\ell}{3}$ . Найдем значения  $w$  на границах указанного интервала, используя выражение (3):

$$w_1 = \frac{2}{2 \cdot 10^{-10}} \sin^2\left(\frac{2\pi \cdot \ell}{\ell \cdot 3}\right) = 0,75 \cdot 10^{10} \text{ м}^{-1},$$

$$w_2 = \frac{2}{2 \cdot 10^{-10}} \sin^2\left(\frac{2\pi \cdot 2\ell}{\ell \cdot 3}\right) = 0,75 \cdot 10^{10} \text{ м}^{-1}.$$

Как видим, плотность вероятности обнаружить электрон на границах заданного интервала - одинакова. Следовательно,  $x_{\max} = \frac{\ell}{3}, \frac{2\ell}{3}, x_{\min} = \frac{\ell}{2}$ .

**Пример 8.** Определить количество теплоты, необходимое для нагревания кристалла NaCl массой  $m=20\text{г}$  на  $\Delta T = 2\text{К}$  от температуры  $T_1 = 2\text{К}$ . Характеристическую температуру Дебая  $\theta_D$  для NaCl принять равной  $320\text{К}$ .

Дано:	СИ
$m=20\text{г}$	$0,02\text{кг}$
$T_1=10\text{К}$	
$\Delta T = 2\text{К}$	
$Q - ?$	

Решение

Количество теплоты, необходимое для нагревания тела массой  $m$  от температуры  $T_1$  до температуры  $T_2$  можно вычислить по формуле:

$$Q = \frac{m}{M} \int_{T_1}^{T_2} C \cdot dT, \quad (1)$$

где  $C$  – молярная теплоемкость вещества,  $M$  – молярная масса.

Согласно теории Дебая, при температуре  $T \ll \theta_D$  молярная теплоемкость кристаллических твердых тел определяется выражением:

$$C_v = \frac{12\pi^4}{5} R \left( \frac{T}{\theta_D} \right)^3. \quad (2)$$

Подставив выражение (2) в (1), и проинтегрировав, получим:

$$Q = \frac{12\pi^4}{5} \frac{m}{M} \frac{R}{\theta_D^3} \int_{T_1}^{T_2} T^3 dT = \frac{12\pi^4}{5} \frac{m}{M} \frac{R}{\theta_D^3} \left( \frac{(T_1 + \Delta T)^4}{4} - \frac{T_1^4}{4} \right).$$

Подставив численные значения и произведя вычисления, найдем  $Q = 1,22 \text{ мДж}$ .

**Пример 9.** Вычислить дефект массы, энергию связи и удельную энергию связи ядра  ${}_{5}^{11}\text{В}$ .

Дано:	
${}_{5}^{11}\text{В}$	
$\Delta m - ?$	
$E_{\text{св}} - ?$	
$\frac{E_{\text{св}}}{A} - ?$	

Решение

Дефект массы ядра определим по формуле:

$$\Delta m = Zm_{\text{H}} + (A - Z)m_{\text{n}} - m_{\text{a}}. \quad (1)$$

Для ядра  ${}_{5}^{11}\text{В}$ :  $Z=5$ ;  $A=11$ .

Вычисление дефекта массы выполним во внесистемных единицах – атомных единицах массы (а.е.м.). Необходимые данные возьмем из таблицы (приложение 3):

$$m_{\text{H}} = 1,00783 \text{ а.е.м.}, \quad m_{\text{n}} = 1,00867 \text{ а.е.м.}, \quad m_{\text{a}} = 11,00931 \text{ а.е.м.}$$

В результате расчета по формуле (1) получим:  $\Delta m = 0,08186 \text{ а.е.м.}$

Энергию связи ядра найдем также во внесистемных единицах (МэВ), воспользовавшись формулой:

$$E_{\text{св}} = \Delta m \cdot c^2. \quad (2)$$

Коэффициент пропорциональности  $c^2 = 931,4 \text{ МэВ/а.е.м.}$ , т.е.

$$E_{\text{св}} = 931,4 \cdot \Delta m.$$

После подстановки численных значений получим:

$$E_{\text{св}} \approx 76,24 \text{ МэВ.}$$

Удельная энергия связи, по определению, равна:

$$\frac{E_{\text{св}}}{A} = 6,9 \text{ МэВ.}$$

**Примечание.** Расчет дефекта массы ядра должен проводиться с максимально возможной точностью, т.е. с учетом всех значащих цифр, указанных в табличных данных.

**Пример 10.** Определить период полураспада радиоактивного изотопа, если известно, что за 1 сутки из 1 млн ядер распадается 175 тысяч.

		Решение
Дано:	СИ:	Период полураспада связан с постоянной радиоактивного распада соотношением:
$t = 1 \text{ сут}$	$8,64 \cdot 10^4 \text{ с}$	
$N_0 = 10^6$		
$\Delta N = 1,75 \cdot 10^5$		
$T_{1/2} - ?$		$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}. \quad (1)$

Постоянную радиоактивного распада  $\lambda$  найдем, используя закон радиоактивного распада:

$$N = N_0 e^{-\lambda t}, \quad (2)$$

где  $N$  – число ядер, не распавшихся к моменту времени  $t$ ,  $N_0$  – начальное число ядер.

Разделив уравнение (2) на  $N_0$  и прологарифмировав обе части, получим:

$$\ln \frac{N}{N_0} = -\lambda t \quad \text{или} \quad \ln \frac{N_0}{N} = \lambda t.$$

Отсюда: 
$$\lambda = \frac{1}{t} \ln \frac{N_0}{N}.$$

Учет того, что  $N = N_0 - \Delta N$ , дает:

$$\lambda = \frac{1}{t} \ln \frac{N_0}{N_0 - \Delta N}.$$

Подставив это выражение в (1), получим для периода полураспада следующее выражение:

$$T_{1/2} = \frac{t \cdot \ln 2}{\ln \frac{N_0}{N_0 - \Delta N}}.$$

Подстановка численных значений и расчет приводят к результату  $T_{1/2} \approx 3,11 \cdot 10^5$  с.

**Примечание.** Решая задачи подобного типа, допускается использование внесистемных единиц измерения времени, таких как - час, сутки, год.

**Пример 11.** При соударении  $\alpha$  - частицы с ядром бора  ${}^{10}_5\text{B}$  произошла ядерная реакция, в результате которой образовалось два новых ядра. Одним из этих ядер оказалось ядро атома водорода  ${}^1_1\text{H}$ . Определить порядковый номер и массовое число второго ядра, дать символическую запись ядерной реакции и определить ее энергетический эффект.

Дано:	Решение
${}^{10}_5\text{B} (\alpha, p) {}^A_Z\text{X}$	Обозначим неизвестное ядро символом ${}^A_Z\text{X}$ .
$Z - ? \quad A - ? \quad X - ? \quad Q - ?$	Так как $\alpha$ - частица представляет собой ядро гелия ${}^4_2\text{He}$ , запись реакции будет иметь вид: ${}^4_2\text{He} + {}^{10}_5\text{B} \rightarrow {}^1_1\text{H} + {}^A_Z\text{X}.$

Применив закон сохранения массового числа, получим:

$$4 + 10 = 1 + A,$$

отсюда  $A = 13$ .

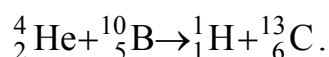
Применив закон сохранения зарядового числа, получим:

$$2 + 5 = 1 + Z,$$

отсюда  $Z = 6$ .

По периодической системе элементов найдем, что неизвестное ядро является ядром изотопа углерода  ${}^{13}_6\text{C}$ .

В окончательном виде реакцию можно записать так:



Определим энергию реакции (энергетический эффект) по формуле:

$$Q = c^2 [(m_{\text{He}} + m_{\text{B}}) - (m_{\text{H}} + m_{\text{C}})]. \quad (1)$$

Заменив массы ядер массами нейтральных атомов, получим:

$$Q = c^2 [(m_{\text{He}} - 2m_e + m_{\text{B}} - 5m_e) - (m_{\text{H}} - m_e + m_{\text{C}} - 6m_e)], \quad (2)$$

где  $m_e$  - масса электрона.

Упростив уравнение (2), получим:

$$Q = c^2 [(m_{\text{He}} + m_{\text{B}}) - (m_{\text{H}} + m_{\text{C}})]. \quad (3)$$

Массы атомов найдем в таблице приложения 3 :

$$m_{\text{B}} = 10,01294 \text{ а.е.м.}, \quad m_{\text{He}} = 4,00260 \text{ а.е.м.},$$

$$m_{\text{H}} = 1,00783 \text{ а.е.м.}, \quad m_{\text{C}} = 13,00335 \text{ а.е.м.}$$

Подставив в (3) массы атомов в а.е.м., а с учетом того, что коэффициент пропорциональности  $c^2 = 931,4 \text{ МэВ/а.е.м.}$ , получим:

$$Q = 4,06 \text{ МэВ.}$$

Реакция идет с выделением тепла, т.е. является экзотермической.

### Контрольная работа № 3

Таблица выбора вариантов индивидуального задания

Вариант	Номера задач										
	1	11	21	31	41	51	61	71	81	91	101
1	1	11	21	31	41	51	61	71	81	91	101
2	2	12	22	32	42	52	62	72	82	92	102
3	3	13	23	33	43	53	63	73	83	93	103
4	4	14	24	34	44	54	64	74	84	94	104
5	5	15	25	35	45	55	65	75	85	95	105
6	6	16	26	36	46	56	66	76	86	96	106
7	7	17	27	37	47	57	67	77	87	97	107
8	8	18	28	38	48	58	68	78	88	98	108
9	9	19	29	39	49	59	69	79	89	99	109
10	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110

1. Найти, какое количество энергии излучает за 1 с один квадратный сантиметр поверхности абсолютно черного тела, если известно, что максимальная спектральная плотность его энергетической светимости приходится на длину волны  $\lambda = 484 \text{ нм}$ .

2. Как меняется температура черного тела, если при ее изменении максимум спектральной плотности энергетической светимости смещается с красной границы видимого спектра ( $\lambda_1 = 760$  нм) на фиолетовую ( $\lambda_2 = 390$  нм).

3. Температура черного тела увеличилась в два раза, в результате чего длина волны, соответствующая максимальной спектральной плотности энергетической светимости уменьшилась на 600 нм. Определить начальную и конечную температуры тела.

4. При нагревании черного тела длина волны, на которую приходится максимум спектральной плотности энергетической светимости, изменилась от 0,69 до 0,5 мкм. Во сколько раз увеличилась при этом энергетическая светимость тела?

5. На какую длину волны приходится максимум спектральной плотности энергетической светимости черного тела, имеющего температуру, равную температуре человеческого тела, т.е.  $t = 37^\circ\text{C}$ ? К какому диапазону электромагнитных волн относится найденная длина волны?

6. Зачерненный шарик остывает от температуры  $27^\circ\text{C}$  до  $20^\circ\text{C}$ . Насколько изменилась длина волны, соответствующая максимуму спектральной плотности его энергетической светимости?

7. Определить, как и во сколько раз изменится мощность излучения черного тела, если длина волны, соответствующая максимуму его спектральной плотности энергетической светимости, сместилась с  $\lambda_1 = 720$  нм до  $\lambda_2 = 400$  нм.

8. Черное тело находится при температуре  $T_1 = 3$  кК. При остывании тела длина волны, соответствующая максимуму спектральной плотности энергетической светимости, изменилась на  $\Delta\lambda = 8$  мкм. Определить температуру  $T_2$ , до которой тело охладилось.

9. Черное тело нагрели от температуры  $T_1 = 600$  К до  $T_2 = 2400$  К. Определить, во сколько раз: 1) увеличилась его энергетическая светимость; 2) изменилась длина волны, соответствующая максимуму спектральной плотности энергетической светимости.

10. Определить мощность, необходимую для поддержания температуры расплавленного никеля  $1453^\circ\text{C}$  неизменной, если площадь его поверхности равна  $0,5$  см<sup>2</sup>. Считать излучение никеля близким к излучению черного тела.

11. Сравнить энергию, массу и импульс фотонов красного ( $\lambda = 0,7$  мкм) и фиолетового ( $\lambda = 0,4$  мкм) излучений.

12. При какой температуре средняя кинетическая энергия теплового движения молекул одноатомного газа равна энергии фотона рентгеновских лучей ( $\lambda = 0,1$  нм)?

13. Найти массу фотона, импульс которого равен импульсу молекулы водорода при температуре  $27^\circ\text{C}$ . Скорость молекулы считать равной средней квадратичной скорости.



14. С какой скоростью должен двигаться электрон, чтобы его кинетическая энергия была равна энергии фотона с длиной волны  $\lambda = 520$  нм?

15. С какой скоростью должен двигаться электрон, чтобы его импульс был равен импульсу фотона с длиной волны  $\lambda = 520$  нм?

16. Какую энергию и частоту должен иметь фотон, чтобы его масса была равна массе покоя электрона?

17. При какой температуре средняя кинетическая энергия молекулы двухатомного газа будет равна энергии фотона с длиной волны  $\lambda = 5,89 \cdot 10^{-4}$  мм? Чему равна масса этого фотона?

18. Сколько фотонов в 1 с испускает электрическая лампочка накаливания, полезная мощность которой 25 Вт, если средняя длина волны излучения составляет 650 нм?

19. Определить длину волны фотона, импульс которого равен импульсу электрона, обладающего скоростью 10 Мм/с.

20. Чувствительность сетчатки глаза (наименьшая мощность излучения, еще воспринимаемая сетчаткой) к желтому свету с длиной волны  $\lambda = 600$  нм составляет  $P = 1,7 \cdot 10^{-18}$  Вт. Сколько фотонов должно падать каждую секунду на сетчатку, чтобы свет был воспринят?

21. Фотоэлектроны, вырываемые с поверхности металла, полностью задерживаются при приложении обратного напряжения  $U_0 = 3$  В. Фотоэффект для этого металла начинается при частоте падающего монохроматического света  $\nu_0 = 6 \cdot 10^{14}$  с<sup>-1</sup>. Определить: 1) работу выхода электронов из этого металла; 2) частоту применяемого облучения.

22. На поверхность литиевого катода падает монохроматическое излучение ( $\lambda = 310$  нм). Чтобы прекратить эмиссию электронов, нужно приложить задерживающую разность потенциалов  $U_0$  не менее 1,7 В. Определить работу выхода  $A$  и красную границу фотоэффекта.

23. Для прекращения фотоэффекта, вызванного облучением ультрафиолетовым излучением платиновой пластинки, нужно приложить задерживающую разность потенциалов  $U_0 = 3,7$  В. Если платиновую пластинку заменить другой пластинкой, то задерживающую разность потенциалов придется увеличить до 6 В. Определить работу  $A$  выхода электронов с поверхности этой пластинки.

24. При облучении фотокатода видимым светом выбиваемые фотоэлектроны полностью задерживаются обратным напряжением  $U_0 = 1,2$  В. Специальные измерения показали, что длина волны падающего света  $\lambda = 400$  нм. Определить красную границу фотоэффекта.

25. Найти частоту света, вырывающего с поверхности катода электроны, полностью задерживаемые обратным напряжением в 3 В. Фотоэффект у этого металла начинается при частоте падающего света в  $6 \cdot 10^{14}$  с<sup>-1</sup>. Чему равна работа выхода электрона из этого металла.

**26.** Плоский серебряный электрод освещается монохроматическим излучением с длиной волны  $\lambda = 83$  нм. Определить, на какое максимальное расстояние от поверхности электрода может удалиться фотоэлектрон, если вне электрода имеется задерживающее электрическое поле напряженностью  $E = 10$  В/см. Красная граница фотоэффекта для серебра  $\lambda_0 = 264$  нм.

**27.** При освещении катода вакуумного фотоэлемента монохроматическим светом с длиной волны  $\lambda = 310$  нм фототок прекращается при некотором задерживающем напряжении. При увеличении длины волны на 25 % задерживающее напряжение оказывается меньше на 0,8 В. Определить по этим экспериментальным данным постоянную Планка.

**28.** Какая доля энергии фотона (в %) израсходована на работу вырывания фотоэлектрона, если красная граница фотоэффекта  $\lambda_0 = 307$  нм и максимальная кинетическая энергия фотоэлектрона равна 1 эВ?

**29.** Катод вакуумного фотоэлемента, изготовленный из калия, освещается монохроматическим излучением с длиной волны 400 нм. Определить наименьшее задерживающее напряжение, при котором фототок прекратится. Работа выхода электронов из калия равна 2,2 эВ.

**30.** Определить постоянную Планка  $h$ , если известно, что фотоэлектроны, вырывающиеся с поверхности некоторого металла светом с частотой  $2,2 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$ , полностью задерживаются обратным потенциалом в 6,6 В, а вырывающиеся светом с частотой  $4,6 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$  - потенциалом в 16,5 В.

**31.** Протон движется в однородном магнитном поле с индукцией  $B = 15$  мТл по окружности радиусом  $R = 1,4$  м. Определить длину волны де Бройля для протона.

**32.** Найти длину волны де Бройля для электрона, движущегося по первой бортовой орбите атома водорода.

**33.** Определить, какую ускоряющую разность потенциалов должен пройти протон, чтобы длина волны де Бройля для него была равна 1 пм.

**34.** Заряженная частица, ускоренная разностью потенциалов  $U_0 = 500$  В, имеет длину волны де Бройля  $\lambda = 1,282$  пм. Принимая заряд этой частицы равным заряду электрона, определить ее массу.

**35.** Вычислить длину волны де Бройля электрона и протона, обладающих кинетической энергией 1,00 кэВ. При каких значениях их кинетических энергий эта длина волны будет равна 100 пм?

**36.** При увеличении энергии электрона на  $\Delta E = 200$  эВ длина волны де Бройля изменилась в 2 раза. Найти первоначальную длину волны де Бройля.

**37.** Найти длину волны де Бройля альфа-частицы, прошедшей ускоряющую разность потенциалов: 1) 1 кВ; 2) 1 МВ.

**38.** Электрон движется со скоростью 200 Мм/с. Определить длину волны де Бройля, учитывая изменение массы электрона в зависимости от скорости.

**39.** Найти кинетическую энергию электрона, при которой соответствующая длина волны де Бройля  $\lambda$  равна радиусу третьей бортовой орбиты.

40. Определить длину волны де Бройля электрона, находящегося в атоме водорода на третьей боровской орбите.

41. Найти неопределенность координаты протона, ускоренного разностью потенциалов  $10^9$  В, соответствующую относительной неопределенности импульса в 0,001.

42. Найти неопределенности скоростей электрона и протона, локализованных в области размером 1 мкм.

43. Оценить неопределенность скорости электрона в атоме водорода, полагая размер атома равным 0,1 нм. Сравнить полученное значение со скоростью электрона на первой боровской орбите.

44. Оценить минимальную кинетическую энергию электрона, локализованного в области размером 0,10 нм.

45. Найти неопределенность координаты альфа - частицы, ускоренной разностью потенциалов  $2 \cdot 10^9$  В, соответствующую относительной неопределенности импульса в 0,002.

46. Электрон с кинетической энергией  $E_k = 10$  эВ локализован в области размером 1,0 мкм. Оценить относительную неопределенность скорости электрона.

47. Частица массы  $m$  локализована в области размером  $d$ . Оценить кинетическую энергию  $E_k$  частицы, если относительная неопределенность ее импульса порядка 0,01.

48. Свободно движущаяся нерелятивистская частица имеет относительную неопределенность импульса порядка  $1,6 \cdot 10^{-4}$ . Оценить, во сколько раз неопределенность координаты такой частицы больше соответствующей длины волны де Бройля.

49. Электронный пучок ускоряется в электронно-лучевой трубке разностью потенциалов  $U_0 = 1$  кВ. Известно, что неопределенность скорости составляет 0,1 % от ее числового значения. Найти неопределенность координаты электрона.

50. Электрон пролетел ускоряющую разность потенциалов 400 кВ. Сравнить длину волны де Бройля этого электрона с величиной неопределенности его координаты, если относительная неопределенность импульса электрона составляет 1%.

51. Используя теорию Бора, определить, как изменилась кинетическая энергия электрона в атоме водорода при переходе его с четвертой орбиты на вторую.

52. Используя теорию Бора, определить частоту  $\nu$  вращения электрона по третьей орбите атома водорода.

53. Атом водорода в основном состоянии поглотил квант света с длиной волны  $\lambda = 121,5$  нм. Используя теорию Бора, определить радиус  $r$  электронной орбиты возбужденного атома водорода.

**54.** Атомарный водород находился в возбужденном состоянии. Определить: а) коротковолновую и длинноволновую границы его излучения, если  $n=4$ ; б) к каким сериям принадлежат спектральные линии, соответствующие излучению таких атомов.

**55.** Используя теорию Бора для атома водорода, определить: а) радиус ближайшей к ядру орбиты; б) скорость движения электрона по этой орбите.

**56.** Используя теорию Бора, определить скорость  $v$  электрона по третьей орбите атома водорода.

**57.** Электрон находится на первой боровской орбите атома водорода. Определить для электрона: а) потенциальную энергию  $E_{\text{пот}}$ ; б) кинетическую энергию  $E_{\text{к}}$ ; в) полную энергию  $E$ .

**58.** Используя теорию Бора, определить частоту фотона, излучаемого атомом водорода, при переходе электрона на уровень с номером  $n=2$ , если радиус орбиты электрона изменился в  $k=9$  раз.

**59.** Используя теорию Бора, найти изменение кинетической энергии электрона в атоме водорода при излучении атомом фотона с длиной волны  $\lambda=486$  нм.

**60.** Вычислить длину волны  $\lambda$  спектральной линии атомарного водорода, частота которой равна разности частот следующих двух линий серии Лаймана:  $\lambda_1=102,60$  нм и  $\lambda_2=97,27$  нм. Какой серии принадлежит данная линия?

В задачах **61-70** частица находится в одномерной прямоугольной "потенциальной яме" с бесконечно высокими "стенками". Ширина ямы -  $\ell$ . Состояние частицы описывается главным квантовым числом  $n$ . Определить: 1) вероятность нахождения частицы в области "ямы"  $\Delta\ell = x_2 - x_1$ ; 2) точки интервала  $[x_1, x_2]$ , в которых плотность вероятности существования частицы максимальна и минимальна.

**61.**  $n=3$ ,  $x_1=0,05\ell$ ,  $x_2=0,2\ell$ .

**62.**  $n=1$ ,  $x_1=0,4\ell$ ,  $x_2=0,9\ell$ .

**63.**  $n=3$ ,  $x_1=0,18\ell$ ,  $x_2=0,4\ell$ .

**64.**  $n=2$ ,  $x_1=0,7\ell$ ,  $x_2=0,9\ell$ .

**65.**  $n=3$ ,  $x_1=0,35\ell$ ,  $x_2=0,52\ell$ .

**66.**  $n=2$ ,  $x_1=0,5\ell$ ,  $x_2=0,8\ell$ .

**67.**  $n=3$ ,  $x_1=0,52\ell$ ,  $x_2=0,7\ell$ .

**68.**  $n=2$ ,  $x_1=0,3\ell$ ,  $x_2=0,6\ell$ .

**69.**  $n=3$ ,  $x_1=0,72\ell$ ,  $x_2=0,95\ell$ .

**70.**  $n=2$ ,  $x_1=0,05\ell$ ,  $x_2=0,26\ell$ .

**71.** Вычислить молярную теплоемкость алмаза при температуре 200 К. Температура Дебая для алмаза равна 1860 К.

**72.** Вычислить удельную теплоемкость рубидия при температуре 3 К. Температура Дебая для рубидия 56 К.

73. Молярная теплоемкость селена при температуре 5 К равна 0,333 Дж/моль К. Вычислить по значению теплоемкости дебаевскую температуру селена.

74. Удельная теплоемкость молибдена при температуре 25 К равна 3,47 Дж/кг К. Вычислить по значению теплоемкости дебаевскую температуру молибдена. Молярная масса молибдена – 0,096 кг/моль.

75. Какое количество теплоты необходимо для нагревания 50 г железа от 10 К до 20 К. Температура Дебая для железа равна 470 К. Молярная масса железа – 0,056 кг/моль.

76. Какое количество теплоты требуется для нагревания 1 моля никеля от 5 К до 15 К. Температура Дебая для никеля равна 450 К.

77. Вычислить удельную теплоемкость цезия при температуре 2 К. Температура Дебая для цезия равна 38 К. Молярная масса цезия - 0,133 кг/моль.

78. Какое количество теплоты требуется для нагревания 10 г алюминия от 15 К до 30 К. Температура Дебая для алюминия равна 418 К. Молярная масса алюминия - 0,027 кг/моль.

79. Какое количество теплоты требуется для нагревания 30 г меди от 20 К до 50 К. Температура Дебая для меди равна 339 К. Молярная масса меди – 0,0635 кг/моль.

80. Вычислить удельную теплоемкость железа при температуре 30 К. Температура Дебая для железа равна 470 К. Молярная масса железа – 0,056 кг/моль.

В задачах **81 - 90** найти дефект массы, энергию связи и удельную энергию связи ядер изотопов:

81. Лития  ${}^7_3\text{Li}$ .

82. Гелия  ${}^4_2\text{He}$ .

83. Алюминия  ${}^{27}_{13}\text{Al}$ .

84. Кислорода  ${}^{16}_8\text{O}$ .

85. Водорода (дейтерия)  ${}^2_1\text{H}$ .

86. Азота  ${}^{14}_7\text{N}$ .

87. Кальция  ${}^{40}_{20}\text{Ca}$ .

88. Меди  ${}^{63}_{29}\text{Cu}$ .

89. Кадмия  ${}^{113}_{48}\text{Cd}$ .

90. Урана  ${}^{238}_{92}\text{U}$ .

91. Какая часть начального количества атомов распадется за один год в радиоактивном изотопе тория  ${}^{228}\text{Th}$  ?

92. Какая часть начального количества ядер актиния  ${}^{225}\text{Ac}$  останется через 5 сут. ? через 15 сут. ?

93. За один год начальное количество радиоактивного изотопа уменьшилось в три раза. Во сколько раз оно уменьшится за два года ?

94. За какое время распадется 1/4 начального количества ядер радиоактивного изотопа, если период его полураспада  $T_{1/2}=24$  ч ?

95. За время  $t=8$  сут. распалось  $k=3/4$  начального количества ядер радиоактивного изотопа. Определить период полураспада  $T_{1/2}$ .

96. Сколько атомов полония распадется за сутки из 1 млн атомов ?

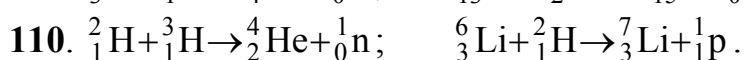
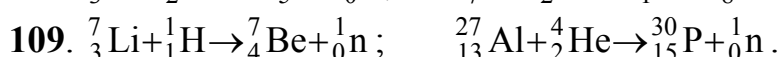
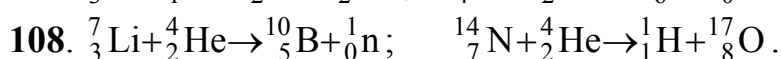
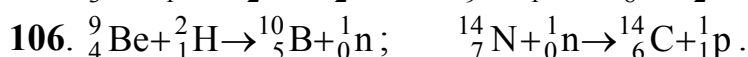
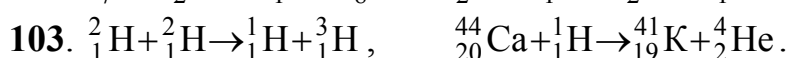
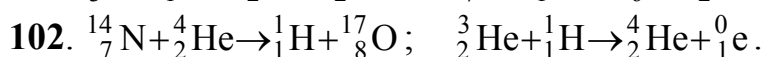
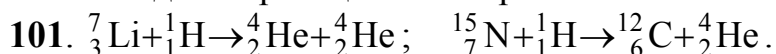
97. Сколько граммов радона распадется за 8 часов, если его начальная масса равняется 0,5 кг ?

98. Найти число распадов за 1 с в 1 г радия -  ${}^{226}_{88}\text{Ra}$ .

99. Период полураспада радиоактивного изотопа актиния  ${}^{225}_{89}\text{Ac}$  составляет 10 сут. Определить время, за которое распадется 1/3 начального количества ядер актиния.

100. Определить период полураспада радиоактивного изотопа, если 5/8 начального количества ядер этого изотопа распалось за время  $t=849$  с.

В задачах 101 - 110 определить энергию ядерных реакций. Определить является ли каждая из реакций экзотермической или эндотермической.



**Физические постоянные**

Название физической постоянной	Обозначение и величина
Скорость света в вакууме	$c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$
Нормальное ускорение свободного падения	$g = 9,81 \text{ м/с}^2$
Гравитационная постоянная	$G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 / (\text{кг} \cdot \text{с}^2)$
Постоянная Авогадро	$N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$
Молярная газовая постоянная	$R = 8,31 \text{ Дж}/(\text{К} \cdot \text{моль})$
Постоянная Больцмана	$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$
Постоянная Планка	$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$ $\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1,055 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$
Элементарный заряд	$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
Масса покоя электрона	$m_e = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$
Масса покоя нейтрона	$m_n = 1,675 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Масса покоя протона	$m_p = 1,672 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Электрическая постоянная	$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$
Магнитная постоянная	$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$
Постоянная Стефана-Больцмана	$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$
Постоянная Вина	$b = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$
Постоянная Ридберга	$R' = 1,1 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$ $R = 3,29 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$
Атомная единица массы	$1 \text{ а.е.м.} = 1,6606 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$

**Единицы измерения физических величин (СИ)  
и их связь с внесистемными единицами**

Физическая величина	Рекомендуемые символы	Наименование единицы измерения	Обозначение единицы измерения	Некоторые внесистемные единицы
<b>Основные единицы</b>				
Длина	l, L	метр	м	1 мм = 10 <sup>-3</sup> м 1 см = 10 <sup>-2</sup> м
Масса	m, M	килограмм	кг	1 г = 10 <sup>-3</sup> кг 1 т = 10 <sup>3</sup> кг 1 а.е.м. = 1,66 · 10 <sup>-27</sup> кг
Время	t, τ	секунда	с	1 мин = 60 с 1 час = 3600 с
Сила электрического тока	I, i	ампер	А	
Термодинамическая температура	T	кельвин	К	1 <sup>0</sup> С = 1 К
Плоский угол	α, φ, θ	радиан	рад	1 <sup>0</sup> = 1,75 · 10 <sup>-2</sup> рад 1' = 2,91 · 10 <sup>-4</sup> рад
<b>Производные единицы.</b>				
Скорость	V, v, u	метр в секунду	м/с	1 км / ч = 0,2(7) м / с
Частота	ν, n, f	герц	Гц	
Частота вращения	n	оборот в секунду	с <sup>-1</sup>	1 мин <sup>-1</sup> = 1 / 60 с <sup>-1</sup>
Циклическая частота	ω	секунда в минус первой степени	с <sup>-1</sup>	1 мин <sup>-1</sup> = 1 / 60 с <sup>-1</sup>
Работа, энергия	A, E, U	джоуль	Дж	1 эВ = 1,6 · 10 <sup>-19</sup> Дж 1 Вт · ч = 3,6 · 10 <sup>3</sup> Дж
Мощность	P, N	ватт	Вт	1 л.с. = 736 Вт
Площадь	S	квадратный метр	м <sup>2</sup>	1 мм <sup>2</sup> = 10 <sup>-6</sup> м <sup>2</sup> 1 см <sup>2</sup> = 10 <sup>-4</sup> м <sup>2</sup>
Объем	V	кубический метр	м <sup>3</sup>	1 мм <sup>3</sup> = 10 <sup>-9</sup> м <sup>3</sup> 1 см <sup>3</sup> = 10 <sup>-6</sup> м <sup>3</sup> 1 л = 10 <sup>-3</sup> м <sup>3</sup>
Количество теплоты	Q	джоуль на килограмм-	Дж/(кг К)	



		кельвин		
Теплоемкость молярная	С	джоуль на моль-кельвин	$\frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$	
Молярная масса	$\mu, \text{М}$	килограмм на моль	кг/моль	1 г/моль= = $10^{-3}$ кг/моль

### Приложение 3

#### Справочные таблицы

#### ДИАПАЗОНЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

Частота, Гц	Диапазон волн	Длина волн, м
$10^3 - 10^{12}$	Радиоволны	$10^5 - 10^{-3}$
$10^{12} - 10^{14}$	Инфракрасный	$10^{-3} - 10^{-7}$
$10^{14}$	Видимый свет	$10^{-7}$
$10^{14} - 10^{17}$	Ультрафиолетовый	$10^{-7} - 10^{-9}$
$10^{17} - 10^{20}$	Рентгеновский	$10^{-9} - 10^{-12}$
$10^{20} - 10^{23}$	$\gamma$ -излучение	$10^{-12} - 10^{-15}$

#### РАБОТА ВЫХОДА ЭЛЕКТРОНОВ, эВ

Вольфрам	4,5	Платина	5,3
Калий	2,2	Серебро	4,3
Литий	2,4	Цинк	4,2
Оксид бария	1,0	Медь	4,47

#### МАССА ПОКОЯ НЕКОТОРЫХ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И ЛЕГКИХ ЯДЕР

Частица	Масса	
	$m_0, \text{кг}$	$m_0, \text{а.е.м.}$
Электрон (позитрон)	$9,11 \cdot 10^{-31}$	0,00055
Протон	$1,67 \cdot 10^{-27}$	1,00728
Нейтрон	$1,68 \cdot 10^{-27}$	1,00867
Дейтон	$3,35 \cdot 10^{-27}$	2,01355
$\alpha$ -частица	$6,64 \cdot 10^{-27}$	4,00149

## МАССЫ НЕЙТРАЛЬНЫХ АТОМОВ

Элемент	Изотоп	Масса, а.е.м.
Водород	$^1\text{H}$	1,007825
	$^2\text{H}$	2,014102
	$^3\text{H}$	3,016049
Гелий	$^3\text{He}$	3,016030
	$^4\text{He}$	4,002604
Литий	$^6\text{Li}$	6,015126
	$^7\text{Li}$	7,016005
Бериллий	$^7\text{Be}$	7,016931
	$^9\text{Be}$	9,012186
	$^{10}\text{Be}$	10,013535
Бор	$^9\text{B}$	9,01333
	$^{10}\text{B}$	10,01294
	$^{11}\text{B}$	11,00931
Углерод	$^{12}\text{C}$	12,00000
	$^{13}\text{C}$	13,00335
	$^{14}\text{C}$	14,00324
Азот	$^{13}\text{N}$	13,00574
	$^{14}\text{N}$	14,00307
	$^{15}\text{N}$	15,00011
Кислород	$^{16}\text{O}$	15,99491
	$^{17}\text{O}$	16,99913
	$^{18}\text{O}$	17,99916
Фтор	$^{19}\text{F}$	18,99840
Магний	$^{23}\text{Mg}$	22,99414
Алюминий	$^{27}\text{Al}$	26,98154
Фосфор	$^{30}\text{P}$	29,97832
Калий	$^{41}\text{K}$	40,96184
Кальций	$^{40}\text{Ca}$	39,97542
	$^{44}\text{Ca}$	43,95549
Медь	$^{63}\text{Cu}$	62,92959
Кадмий	$^{113}\text{Cd}$	112,94206
Уран	$^{235}\text{U}$	235,04393
	$^{238}\text{U}$	238,05076

## ПЕРИОД ПОЛУРАСПАДА РАДИОАКТИВНЫХ ИЗОТОПОВ

Изотоп	Символ изотопа	Период полураспада
Актиний	${}_{89}^{225}\text{Ac}$	10 сут.
Йод	${}_{53}^{131}\text{I}$	8,065 сут.
Иридий	${}_{77}^{192}\text{Ir}$	74,3 сут.
Радий	${}_{88}^{219}\text{Ra}$	$10^{-3}$ с.
Радий	${}_{88}^{226}\text{Ra}$	$1,62 \cdot 10^3$ лет
Радон	${}_{86}^{222}\text{Rn}$	3,824 сут.
Торий	${}_{90}^{228}\text{Th}$	1,913 лет
Торий	${}_{90}^{229}\text{Th}$	$7 \cdot 10^3$ лет
Полоний	${}_{84}^{210}\text{Po}$	138,4 сут.

## ТАБЛИЦА ДЕСЯТИЧНЫХ ПРИСТАВОК

Приставка	Множитель	Обозначение	Приставка	Множитель	Обозначение
Тера	$10^{12}$	Т	Санتي	$10^{-2}$	с
Гига	$10^9$	Г	Милли	$10^{-3}$	м
Мега	$10^6$	М	Микро	$10^{-6}$	мк
Кило	$10^3$	к	Нано	$10^{-9}$	н
Деци	$10^{-1}$	д	Пико	$10^{-12}$	п

## ГРЕЧЕСКИЙ АЛФАВИТ

Альфа	Α α	Эта	Η η	Ню	Ν ν	Тау	Τ τ
Бета	Β β	Тэта	Θ θ	Кси	Ξ ξ	Ипсилон	Υ υ
Гамма	Γ γ	Йота	Ι ι	Омикрон	Ο ο	Фи	Φ φ
Дельта	Δ δ	Каппа	Κ κ	Пи	Π π	Хи	Χ χ
Эпсилон	Ε ε	Ламбда	Λ λ	Ро	Ρ ρ	Пси	Ψ ψ
Дзета	Ζ ζ	Мю	Μ μ	Сигма	Σ σ	Омега	Ω ω

## Приближенные вычисления

*Приближенным числом  $a$*  называется число, незначительно отличающееся от точного  $A$  и заменяющее последнее в вычислениях.

При записи приближенного числа все сохраняемые десятичные знаки называются значащими цифрами.

*Значащей цифрой* приближенного числа называется всякая цифра в его десятичном изображении, отличная от нуля, и нуль, если он содержится между значащими цифрами или является представителем сохраненного десятичного разряда.

Точность приближенного числа зависит не от количества значащих цифр, а от количества верных значащих цифр.

Значащая цифра приближенного числа является *верной*, если абсолютная погрешность этого числа не превышает половины единицы разряда, выражаемого  $n$ -й значащей цифрой, считая слева направо.

### *Правила округления*

Чтобы округлить число до  $n$  значащих цифр, отбрасывают все цифры его, стоящие справа от  $n$ -й значащей цифры, или, если это нужно для сохранения разрядов, заменяют их нулями. При этом:

1) если первая из отброшенных цифр меньше 5, то оставшиеся десятичные знаки сохраняются без изменения;

2) если первая из отброшенных цифр больше 5, то к последней оставшейся цифре прибавляется единица;

3) если первая из отброшенных цифр равна 5 и среди остальных отброшенных цифр имеются ненулевые, то последняя оставшаяся цифра увеличивается на единицу;

4) если же первая из отброшенных цифр равна 5 и все остальные отброшенные цифры являются нулями, то последняя оставшаяся цифра сохраняется неизменной, если она четная, и увеличивается на единицу, если она нечетная (правило четной цифры).

Примеры округления до трех значащих цифр:

$$1,568913 \approx 1,57$$

$$0,0783257 \approx 0,0783$$

$$2,42500 \approx 2,42$$

$$865913,34 \approx 8,66 \cdot 10^5$$

Воронцов Борис Сергеевич  
Новгородова Татьяна Назаровна  
Солодовников Вячеслав Михайлович  
Полякова Елена Николаевна

## **ФИЗИКА**

### Часть 3

(элементы квантовой физики и физики твердого тела,  
элементы физики атомного ядра и элементарных частиц)

Методические указания и контрольные задания  
для студентов заочной формы обучения направлений: 150200,  
280000, 140000, 190600, 220300, 200000, 190200, 151000,  
190600, 050501, 260600, 080000, 190700, 220000;  
специальностей: 150202, 280100, 140211, 190601, 190603,  
220301, 200503, 190201, 190202, 151001, 151002,  
190601, 260601, 080502, 190702, 220200.

Редактор Н.М. Кокина

---

Подписано к печати	Формат 60x84 1/16	Бумага тип. № 1
Печать трафаретная	Усл.печ.л. 3,25	Уч.-изд. л. 3,25
Заказ	Тираж	Цена свободная

---

Редакционно-издательский центр КГУ  
640669, г. Курган, ул. Гоголя, 25  
Курганский государственный университет